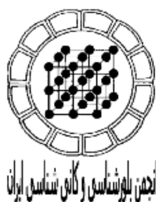
مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران

سال بیست و چهارم، شمارۀ چهار، زمستان ۹۵، از صفحۀ ۷۸۹ تا ۷۹۸



بررسی ویژگی‌های ساختاری و الکتریکی نانوکامپوزیت‌های دورگه‌ی Al_2O_3/PVP (به عنوان درگاه دی الکتریک ترانزیستورهای اثر میدانی آلی)

سید باقر سلطانی[۱]، منوچهر بابایی پور*[۱]، علی بهاری[۲]

۱-گروه فیزیک، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

۲-گروه فیزیک حالت جامد، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران

(دریافت مقاله: ۹۴/۱۱/۳، نسخه نهایی: ۹۵/۴/۱۹)

چکیده: نمونه‌های پودری نانوکامپوزیت دورگه‌ای Al_2O_3/PVP به روش سل-ژل در دمای ۸۰ درجه‌ی سانتی‌گراد سنتز شده‌اند. درصد وزنی پلی وینیل فنول و اکسید آلومینیوم برابر صفر، ۰٫۲۸، ۰٫۵۶ و ۰٫۸۴ بوده است. برای بررسی ویژگی‌های نانوساختاری از روش فراپراشی پرتو ایکس، بیناب‌سنجی تبدیل فوریه فروسرخ، میکروسکوپ الکترونی روبشی، و میکروسکوپ نیروی اتمی استفاده شد. ثابت دی الکتریک نمونه‌ها با استفاده از روش GPS 132 A محاسبه شدند. برپایه‌ی نتایج بدست آمده بالاترین مقدار ثابت دی الکتریک در بسامد ۱۲۰ کیلوهرتز وابسته به نمونه‌ی ریزنهشته با ترکیب وزنی ۰٫۲۸ درصد از PVP(۳۵ = k) و در بسامد ۱ کیلوهرتز وابسته به نمونه‌ی ریزنهشته با ترکیب وزنی ۰٫۵۶ درصد از PVP (۲۶ = k) است. بنابراین در فرکانس ۱۲۰ کیلوهرتز، نمونه‌ی ریزنهشته با ترکیب وزنی ۰٫۲۸ درصد از PVP به سبب برخورداری از ضخامت معادل اکسیدی بالاتر، میزان زبری کمتر، خواص اهمی و I-V بهتر و کوچکی اندازه ریزبلورک‌ها (قطر شِرِر برابر با ۴۵ nm)، و ثابت دی الکتریک بالاتر و در نتیجه جریان نشتی کمتر، به عنوان درگاه دی الکتریک در ترانزیستورهای اثر میدانی توصیه می‌شوند.

واژه‌های کلیدی: *ریزنهشته؛ ترانزیستور اثر میدانی آلی؛ درگاه دی الکتریک؛ روش سُل-ژِل.*

مقدمه

در قطعات نانوالکترونیکی و نانواپتوالکترونیکی، به ویژه در ترانزیستورهای اثر میدانی با مبنای سیلیکونی، ضخامت درگاه دی‌الکتریک تا حدود ۱ تا ۲ نانومتر رسیده است که با مشکلاتی همچون افزایش تونل زنی کوانتومی، افزایش جریان نشتی و نفوذ اتم‌های سبک بور از درگاه دی‌الکتریک فرانازک رو به رو است و به پیروی از این عوامل موجب کاهش کارآیی ترانزیستور می‌شوند. از این رو معماری جدیدی برای ترانزیستورهای اثر میدانی مطرح شد [۱-۶]. در این ارتباط برخی محققان مواد متعددی با ثابت دی‌الکتریک بالا، همچون Al_2O_3، La_2O_3، HfO_2،Ta_2O_5، TiO_2 و ZrO_2 را به عنوان عایق حائل در ترانزیستورهای اثر میدانی فلز-اکسید-نیمه رسانا (MOSFET) پیشنهاد کردند [۶-۷]. از طرف دیگر با وجود بالا بودن ثابت دی‌الکتریک آنها، به دلیل تشکیل یک لایه‌ی میانی ناخواسته‌ی SiO_2 بین زیرلایه‌ی سیلیکونی و این مواد، نتوانستند جای اکسید سیلیکون را به عنوان درگاه دی الکتریک مناسب بگیرند [۸]. از طرف دیگر، مواد آلی به دلیل ویژگی‌های مختلف الکتریکی، انعطاف پذیر بودن و هزینه کمتر، در کانون توجهات پژوهشگران این عرصه قرار گرفت [۹]. از طرف دیگر این مواد به دلیل دارا بودن ظرفیت خیلی پایین و خاصیت آبگریزی بیشتر نسبت به مواد غیرآلی، به تنهایی قابلیت زیادی نداشتند. از این رو دی‌الکتریک‌های دورگه‌ی آلی-غیرآلی به دلیل ترکیب

*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۸۳۱۶۵۶۶۲، پست الکترونیکی: babaei@basu.ac.ir

[DOR: 20.1001.1.17263689.1395.24.4.14.2]

هم‌افزای مثبت و تکمیل کننده، جنبه‌های عملکردی مواد غیرآلی و آلی (تحرک‌پذیری بالای حامل‌های بار نیمه هادی‌های غیر آلی و هزینه‌ی پایین تولید مواد آلی و انعطاف‌پذیری مناسب آن‌ها)، مورد توجه قرار گرفتند [۱۰]. برپایه‌ی بسیاری از پژوهشگران [۱۱-۱۴]، درگاه دی‌الکتریک بی شکل، موادی با ثابت دی‌الکتریک بالا، زبری و ناهمواری سطحی کم و تحرک‌پذیری بالا و جریان نشتی پایین می‌توانند به عنوان کاندیدای مواد درگاه دی الکتریکی مطرح شوند. از این رو اطمینان از اینکه لایه‌های ساخته شده دارای ساختارهای بلوری خوش تعریف نباشند سودمند خواهد بود. این برداشت برپایه‌ی XRD تأیید می‌شود. به‌این دلیل، فازهای بلوری ریزهمنهشتی‌های دورگه‌ای از طریق تحلیل‌های XRD بررسی می‌شود. از طرف دیگر، کارآیی قطعات ترانزیستورهای اثر میدانی آلی (OFET) به استفاده از دی‌الکتریک‌های پُر بازده‌ای که سطوح فعال را شکل می‌دهند، با چگالی نقص اندک یا سطوح نرم و دارای توپوگرافی و ریخت‌شناسی خوب، بستگی دارد. بنابراین، بررسی میکروسکوپی و ریخت‌شناسی سطح با استفاده از روش‌های SEM و AFM به خوبی انجام می‌شود.

علاوه براین، اخیراً همبستگی زبری سطح و تحرک پذیری در مواد کامپوزیت هیبریدی توسط چواَ و همکارانش مورد بررسی قرار گرفتند [۱۴]. آنها معتقدند که افزایش زبری در سطح منجر به کاهش تحرک‌پذیری OFET می‌شود. از این رو بررسی و اندازه‌گیری زبری متوسط، و ریشه‌ی میانگین مربعات با نرم افزار Nanosurf ضروری است. اکسید آلومینیوم معروف به آلومینا یکی از مهمترین سرامیک‌های الکترونیکی است که کاربردهای صنعتی زیادی از جمله در صنعت میکروالکترونیک و نیز به عنوان یک کاتالیست و یک ماده‌ی دی‌الکتریک دارد، و ثابت دی‌الکتریک آن حدود ۹ است [۹]. از سوی دیگر ماده‌ی آلی پلی وینیل فنول با فرمول C_8H_8O (فرمول خطی $[CH_2CH(C_6H_4OH)]_n$) یکی از بهترین‌های این مواد آلی در حوزه‌های زیست‌الکترونیک، مواد دی‌الکتریک و ترانزیستورهای آلی قابل انعطاف است. در این حوزه از همنهشت‌های دو رگه‌ی موادی نظیر اکسید آلومینیوم (غیرآلی) و PVP (آلی) تلاش می‌شود تا امکان معرفی آن به جای اکسید سیلیکون را بررسی کنیم. دراین مقاله به بررسی نانوساختاری و ویژگی‌های الکتریکی چنین نمونه‌ها متمرکز شده است.

آزمایش

نمونه‌های نانوکامپوزیت دورگه‌ی Al_2O_3/PVP به روش سل-ژل سنتز شده‌اند، که در آن تری‌سِک‌بوتوکساید ۹۷٪ ($Al[OCH(CH_3)C_2H_5]_3$) با حلال‌های استیل استن و اتانول به عنوان پیش ماده، برای نانو بلورک‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. استیل استن به عنوان حلال پلی وینیل فنول به کار رفته است. ۰/۵ میلی‌لیتر تری‌سِک‌بوتوکساید را در ۵ میلی‌لیتر استیل استن ۹۸٪ و ۵ میلی‌لیتر اتانول ۹۸٪ حل کرده و گذاشتیم تا به مدت ۲ ساعت در دمای اتاق با همزن مغناطیسی بچرخد. همزمان ۰/۰۴۰ گرم از PVP را در ۵ میلی‌لیتر استیل استن قرار داده، اجازه دادیم تا به مدت ۲ ساعت در دمای اتاق با همزن مغناطیسی چرخیده، و کاملاً حل شود. سپس محلول دوم را به آرامی به محلول اول اضافه کرده و ۲۲ ساعت در دمای اتاق با همزن مغناطیسی چرخید، پس از این مدت، دمای همزن مغناطیسی را در ۱۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد تنظیم کرده، و اجازه دادیم تا همچنان بچرخد. محلول پس از ۲ ساعت به ژل تبدیل شد. این نمونه‌ی ژل شده به مدت ۱۵ ساعت در کوره با دمای ۷۰ درجه‌ی سانتی‌گراد خشک و آسیاب شده و به پودر نرمی با رنگ کرم تبدیل شد. بدین ترتیب نمونه‌ی پودری با ترکیب وزنی ۰/۲۸ درصد از (Al_2O_3+ 0.28 %wt. PVP) به دست آمد. آزمایش برای درصدهای وزنی ۰/۵۶ و ۰/۸۴ نیز به روشی کاملاً مشابه بارها تکرار شده و پودرهایی با مشخصات ظاهری مشابه به دست آمدند. علاوه بر این فرایند، بدون استفاده از پلی وینیل فنول یعنی با صفر درصد PVP نیز تکرار شد.

بحث و بررسی

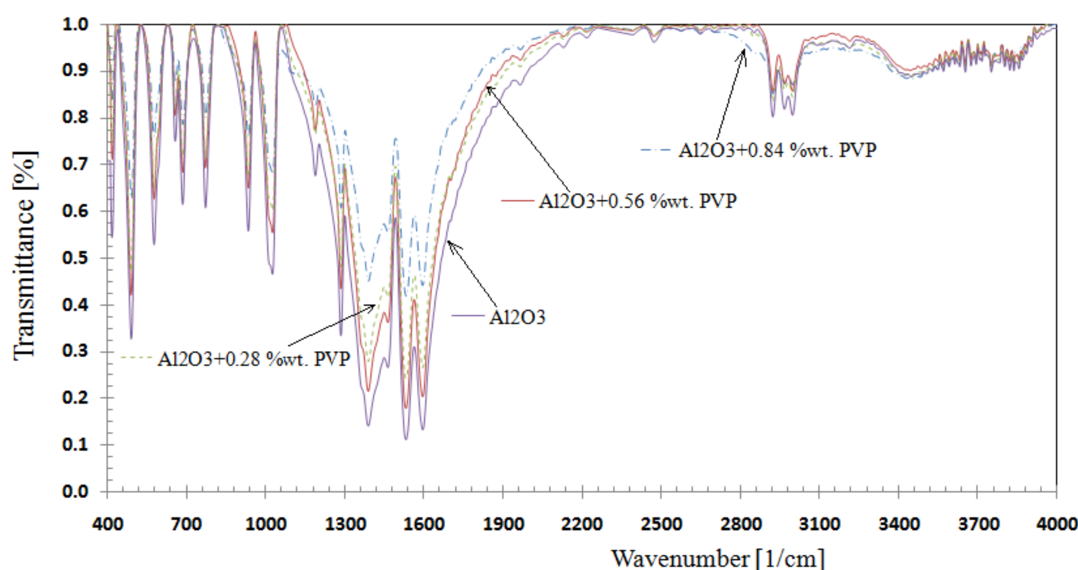
شناخت عوامل متعددی که بر پیوندهای شیمیایی و ارتعاش‌های خمشی ساختارهای دی الکتریک درگاه مؤثر اهمیت دارد. از این رو طیف FTIR وابسته به پودرهای Al_2O_3 و همبافت‌های پلیمری Al_2O_3/PVP بر حسب درصد گذردهی، در شکل ۱ آمده است.

قلّه‌های متعددی در شکل ۱ مشاهده می‌شوند که با استفاده از کارت استاندارد FTIR شناسایی شدند. قلّه‌های FTIR در نواحی $۶۹۰cm^{-1}$، ۵۸۰ و ۴۸۶ مربوط به ارتعاش های کششی پیوند Al-O هستند. حضور قلّه‌ها در نواحی $۱۵۹۶cm^{-1}$، ۱۵۲۵ و

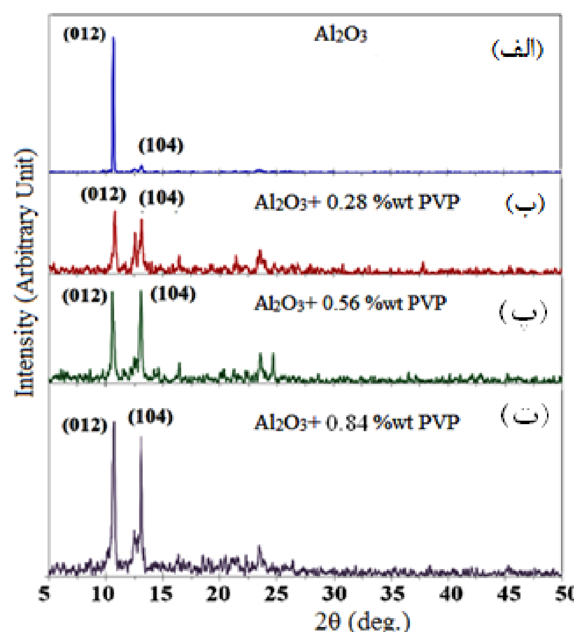
[DOR: 20.1001.1.17263689.1395.24.4.14.2]

۱۳۹۴ به ارتعاش خمشی پیوند OH مولکول‌های آب جذب سطحی شده بر روی Al_2O_3 وابسته‌اند و حضور قلّه‌ی پهن در ناحیه $۳۴۴۰cm^{-1}$ نیز به ارتعاش کششی مولکول‌های آبِ جذب سطحی شده بر روی Al_2O_3 وابسته است. چنانکه در این شکل مشاهده می شود، تأثیر PVP به صورت کاهش شدت قلّه های جذبی شاخص وابسته به Al_2O_3 نمایان شده است. در نتیجه، تنها از روی کاهش شدت قلّه‌ها که به دلیل افزایش درصد ورنی PVP نسبت به بستر Al_2O_3 است می‌توان تشکیل نانوکامپوزیت را تائید کرد.

ساختارهای بلوری و اندازه‌ی نانوبلورک‌ها با استفاده از روش پراش پرتو X (XRD) تعیین می‌شوند. شکل ۲ اثر غلظت PVP بر الگوی پراش نانوهمنهشت‌های دورگه‌ی مورد بررسی را نشان می‌دهد. با زیاد شدن مقدار PVP در همنهشت‌ها، فازهای بس بلوری متفاوتی شکل می‌گیرند.



شکل ۱ طیف FTIR مربوط به Al_2O_3 و نانو کامپوزیت‌های Al_2O_3/PVP با نسبت های ۰٫۲۸، ۰٫۵۶ و ۰٫۸۴ از PVP.



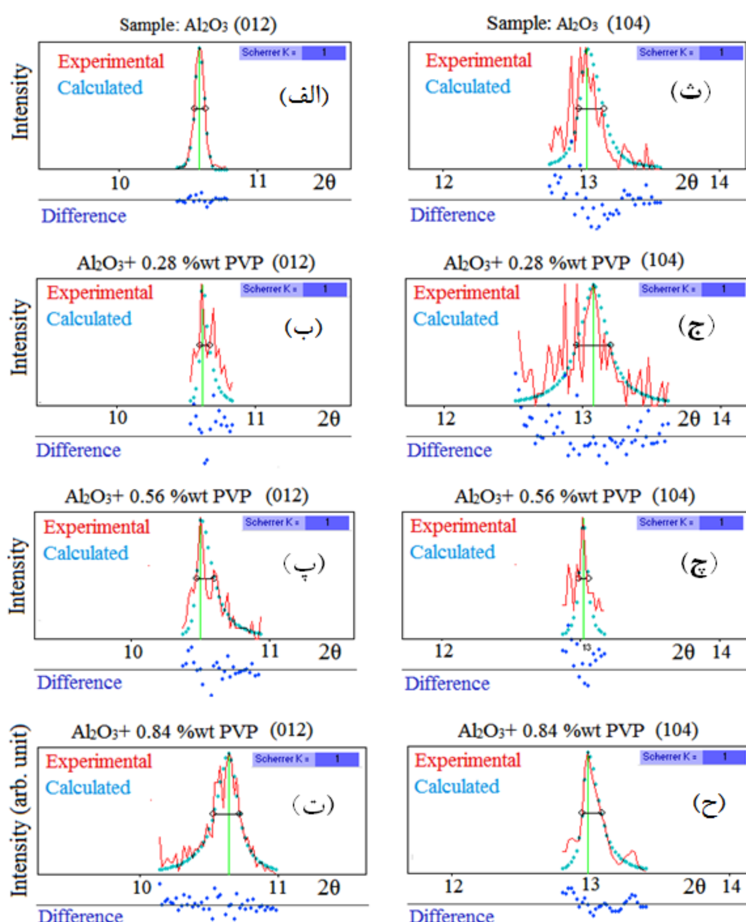
شکل ۲ الگوهای XRD مربوط به نمونه های (الف) Al_2O_3، (ب) Al_2O_3+ 0.28 %wt PVP، (پ) Al_2O_3+ 0.56 %wt PVP، (ت) Al_2O_3+ 0.84 %wt PVP.

چنانکه در شکل‌های ۲ الف تا ۲ ت مشاهده می‌شود، طیف وابسته به نمونه‌ی اکسید آلومینیوم، یک قله شاخص را نشان می‌دهد و ژل تقریباً به صورت تک‌بلور تشکیل شده است. زمانی که PVP تا ۰٫۲۸ درصد افزایش می‌یابد، تعداد و شدت قله‌ها تغییر می‌کند. در نمونه ۰٫۵۶ درصد PVP همچنان دو فاز وابسته به $Al_2O_3(012)$ و $Al_2O_3(104)$ در حال رشد هستند [۱۵]. در نمونه‌ی ۰٫۸۴ درصد، شدت این دو قله زیاد می‌شود ولی در زاویه‌های دیگر همچنان شاهد تشکیل چشمگیری فازی نیستیم. که نشان می‌دهد دمای بلوری ماده افزایش یافته است، و چنانکه پیش از این گفته شد اندازه‌ی دانه‌های بلورک‌ها نیز با استفاده از رابطه شِرِر تعیین می‌شوند که در آن D میانگین اندازه‌ی بلورک‌های

$$D = \frac{K\lambda}{\beta.\cos\theta}$$

Al_2O_3/PVP، K ثابت شرر، برابر با ۰٫۹۴، λ طول موج تابش فرودی (Cu_{ka} = 1.5406 A°)، β پهنای کامل شدت در نیمه‌ی بیشینه‌ی (FWHM) و θ زاویه براگ متناظر با قله‌ی مورد بررسی هستند. برای محاسبه اندازه بلورک‌ها و پهنای کامل شدت در نیمه ماکزیمم (FWHM) از نرم افزار X-powder استفاده شد. در شکل ۳ نتیجه‌ی بررسی قله‌های (012) و (104) در این نرم افزار آمده است. منحنی برازش شده و پهنای FWHM نیز در شکل مشخص شده است و خلاصه‌ی نتایج در جدول ۱ ملاحظه می‌شود، ولی با این توضیح که در محاسبه‌ی اندازه دانه‌ها در رابطه شِرِر از کرنش چشمپوشی شده است.

چنانکه در جدول ۱ ملاحظه می‌شود کمترین اندازه‌ی نانوبلورک‌ها با استفاده از قله دوم (104) وابسته به نمونه‌ی Al_2O_3+ 0.28 %wt PVP (۳۶ nm) و با استفاده از قله‌ی اول وابسته به Al_2O_3+ 0.84 %wt PVP (۴۷ nm) هستند.



شکل ۳ محاسبه FWHM روی قله‌های متناظر در الگوهای XRD برای (الف) و (ث) Al_2O_3 به ترتیب در قله‌های (012) و (104)، (ب) و (ج) Al_2O_3+ 0.28 %wt PVP به ترتیب در قله‌های (012) و (104)، (پ) و (چ) Al_2O_3+ 0.56 %wt PVP به ترتیب در قله‌های (012) و (104)، (ت) و (ح) Al_2O_3+ 0.84 %wt PVP به ترتیب در قله‌های (012) و (104) با استفاده از نرم افزار X-Powder.

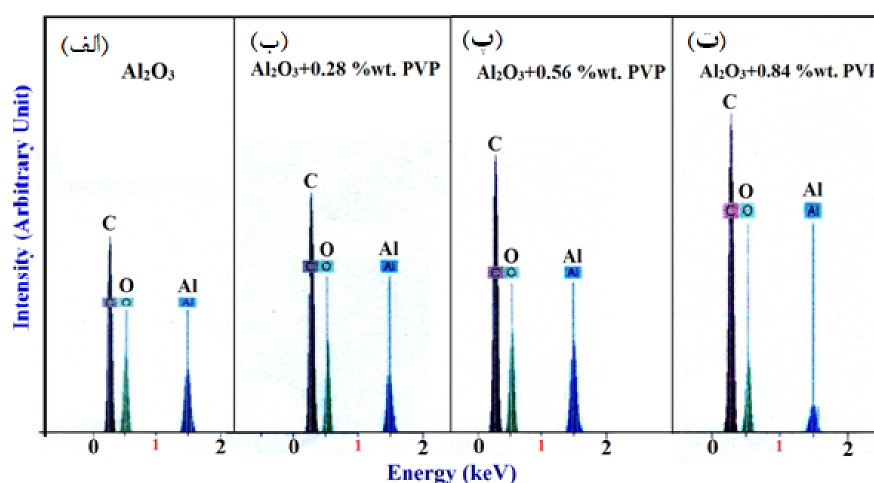
[DOR: 20.1001.1.17263689.1395.24.4.14.2]

جدول ۱ مقادیر FWHM و قطر شرِر برای اندازه دانه‌های نانوبلورک‌ها، به دست آمده از قله‌های (012) و (104) در الگوهای XRD برای چهار نمونه Al_2O_3، Al_2O_3+ 0.28 %wt PVP، Al_2O_3+ 0.56 %wt PVP و Al_2O_3+ 0.84 %wt PVP با استفاده از نرم افزار X-Powder.

نمونه	FWHM		Scherrer (nm)	
	(012)	(104)	(012)	(104)
Al_2O_3	۰٫۰۷۳	۰٫۱۷۶	۱۱۰	۴۹
Al_2O_3+ 0.28 %wt. PVP	۰٫۰۶۰	۰٫۲۴۲	۱۲۹	۳۶
Al_2O_3+ 0.56 %wt. PVP	۰٫۱۲۴	۰٫۰۵۲	۷۰	۱۳۲
Al_2O_3+ 0.84 %wt. PVP	۰٫۱۸۸	۰٫۱۳۲	۴۷	۶۵

در شکل‌های ۴ الف تا ت، تحلیل‌های EDX بدست آمده از ریزدورگه‌های همنهشت وجود نانوذرات C، Al و O را تأیید می‌کنند. نتایج تحلیل‌های EDX در جدول ۲ نشان می‌دهند که غلظت (C) در نمونه‌ی Al_2O_3+ 0.84 %wt PVP بیشتر است. از طرف دیگر تصاویر SEM وابسته به نمونه‌های Al_2O_3 و درصدهای مختلف Al_2O_3/PVP در شکل‌های ۵ الف تا ت هیچ دانه بلور قابل تشخیصی را نشان نمی‌دهد، ولی بر نشانه‌هایی از شکنندگی تُرد گونه روی سطح دلالت دارند.

چنانکه در تصاویر SEM وابسته به Al_2O_3 و نمونه‌های Al_2O_3/PVP مشاهده می‌شوند، وقتی مقادیر PVP در Al_2O_3/PVP به مقدار ۰٫۲۸ درصد وزنی افزایش می‌یابد، سطحی هموارتر با زبری کمتر از دیگر مقادیر PVP شکل می‌گیرد (جدول ۳). زبری سطح به افزایش بی‌نظمی کمک کرده و مانع رشد یکنواخت نیمه‌رسانا می‌شود [۱۶]. می‌دانیم که زبری دی‌الکتریک به علت ایجاد بی‌نظمی در لایه‌ی انباشت باعث کاهش تحرک‌پذیری حامل‌ها در نیمرساناهای آلی می‌شود [۱۸،۱۷،۱۴]. و در نتیجه با توجه به رابطه $\sigma = q(n\mu_\theta + p\mu_p)$، موجب کاهش رسانایی خواهد شد.

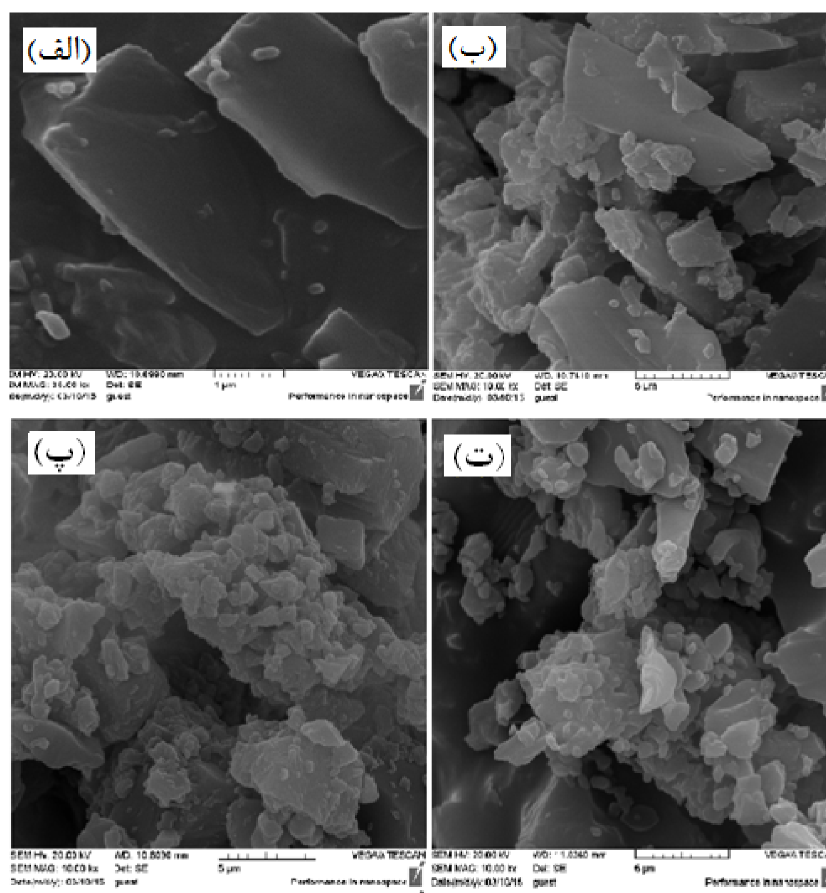


شکل ۴ نتایج EDX برای نمونه‌های (الف) Al_2O_3، (ب) Al_2O_3+ 0.28 %wt PVP، (پ) Al_2O_3+ 0.56 %wt PVP، (ت) Al_2O_3+ 0.84 %wt PVP.

جدول ۲ نتایج EDX برای نمونه‌های (الف) Al_2O_3، (ب) Al_2O_3+ 0.28 %wt PVP، (پ) Al_2O_3+ 0.56 %wt PVP، (ت) Al_2O_3+ 0.84 %wt PVP.

Sample	Series	norm. C[wt. %]				Atom. C[wt. %]			
		C	O	Al	Total (%)	C	O	Al	Total (%)
Al_2O_3	K series	۴۸٫۵۱	۴۳٫۵۷	۷٫۹۲	۱۰۰	۵۷٫۲۵	۳۸٫۵۹	۴٫۱۶	۱۰۰
Al_2O_3+0.28 %wt. PVP	K series	۵۰٫۵۲	۴۳٫۳۸	۶٫۱۰	۱۰۰	۵۸٫۸۸	۳۷٫۹۶	۳٫۱۶	۱۰۰
Al_2O_3+0.56 %wt. PVP	K series	۵۰٫۰۶	۴۲٫۴۴	۷٫۵۰	۱۰۰	۵۸٫۷۱	۳۷٫۳۷	۳٫۹۲	۱۰۰
Al_2O_3+0.84 %wt. PVP	K series	۵۹٫۰۷	۳۷٫۷۰	۳٫۲۳	۱۰۰	۶۶٫۵۱	۳۱٫۸۷	۱٫۶۲	۱۰۰

[DOR: 20.1001.1.17263689.1395.24.4.14.2]



شکل ۵ تصاویر SEM برای نمونـه‌هـای (الـف) Al_2O_3، (ب) Al_2O_3+ 0.28 %wt PVP، (پ) Al_2O_3+ 0.56 %wt PVP، (ت) Al_2O_3+ 0.84 %wt PVP.

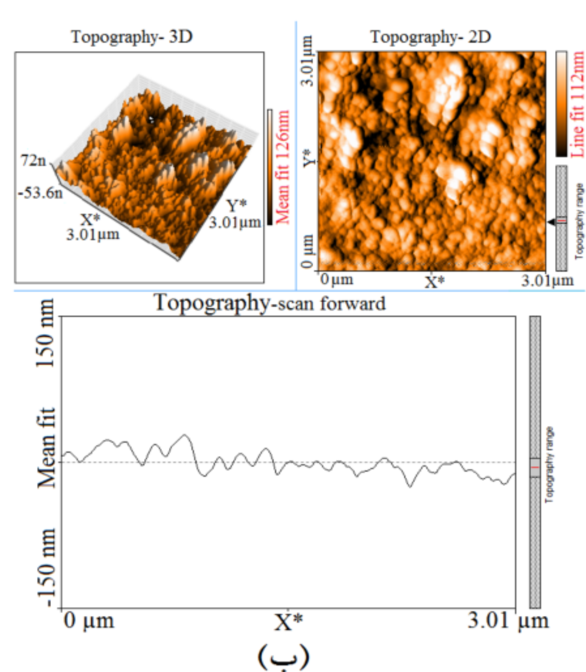
جدول ۳ فاکتورهای زبری سطح برای Al_2O_3 و نمونه‌های Al_2O_3/PVP، به دست آمده از نرم افزار Nanosurf.

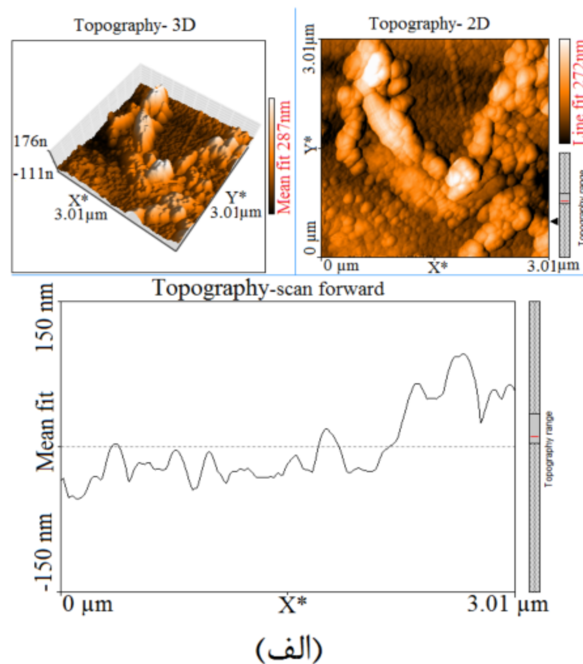
Sample	Area (pm^2)	S_a (nm)	S_q (nm)	S_y (nm)	S_p (nm)	S_v (nm)	S_m (pm)
Al_2O_3	۹/۱۱۸	۳۹	۴۹	۳۲۰	۱۸۸	-۱۳۲	۴۶/۰
Al_2O_3+ 0.28 %wt PVP	۹/۱۱۸	۱۶	۲۱	۱۴۸	۸۷	-۶۱	۰/۴
Al_2O_3+ 0.56 %wt PVP	۹/۱۱۸	۲۷	۳۴	۲۴۵	۱۳۶	-۱۱۰	۱/۰
Al_2O_3+ 0.84 %wt PVP	۹/۲۰۴	۲۲	۲۸	۲۴۳	۱۲۷	-۱۱۵	۲۴/۳

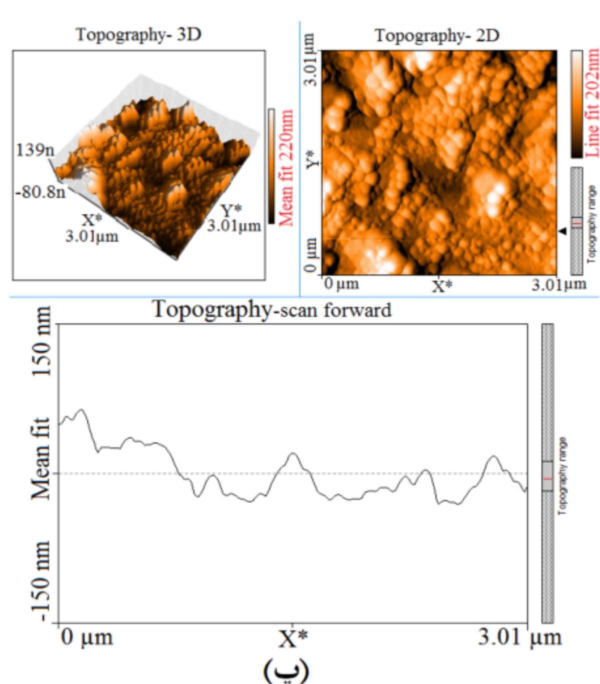
شکل‌های ۶ الف تا ت تصاویر AFM دو بعدی (2D)، سه بعدی (3D) و نیمرخ قائم توپوگرافی وابسته به نانو همنهشت دورگه‌ی Al_2O_3 و Al_2O_3/PVP با غلظت های مختلف PVP سنتز شده در دمای ۸۰ درجه‌ی سانتی گراد را نشان می‌هند. برای تهیه‌ی تصاویر AFM نخست نمونه‌ی پودری را در حلال آن حل کرده تا محلول یک درصدی از آن تهیه شود و پس از همگن سازی به روش فراصوتی، چند قطره از محلول همگن شده را روی لامل ریخته و پس از خشک شدن، تصویربرداری کردیم، در جدول ۳ نیز عامل زبری نمونه‌های Al_2O_3 و Al_2O_3/PVP که با نرم‌افزار Nanosurf به دست آمده‌اند نمایش داده شده‌اند[۱۳].

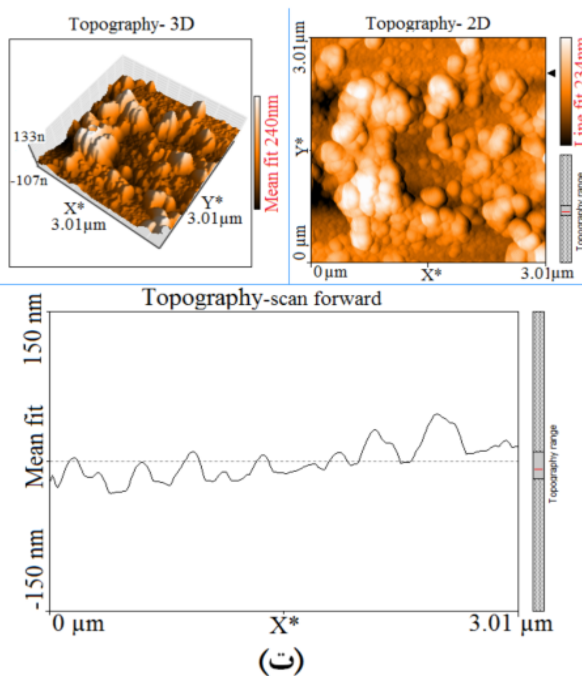
پارامترهای زبری سطح نیز با نرم افزار Nanosurf محاسبه شده‌اند. این پارامترها عبارتند از: S_a، S_q، S_m، S_v، S_p،S_yوS_a (مقدار زبری متوسط) متوسط مجموع فاصله‌ی همه نقاط از

سطح مورد سنجش، در جهت عمود بر صفحه وابسته به؛ S_q مقدار ریشه میانگین مربعات؛ S_m (مقدار میانگین زبری) نیز با همان مقدار متوسط مجموع تعریف می‌شود، اما در اینجا مقادیر مثبت یا منفی بردارها در نظر گرفته می‌شوند؛ S_v (عمق درّه) فاصله‌ی بین صفحه مشروط و پایین‌ترین نقطه سطح مورد سنجش؛ S_p (ارتفاع قله) فاصله‌ی بین بالاترین نقطه‌ی سطح مورد سنجش و صفحه‌ی مشروط؛ S_y (ارتفاع قله-درّه) فاصله‌ی بین بالاترین (S_p) و پایین‌ترین (S_v) نقاط صفحه مورد سنجش این پارامترها در جدول ۳ نمایش داده شده‌اند.









شکل ۶ تصاویر دو و سه بعدی AFM و بهترین نیمرخ توپوگرافی برای نمونه‌های (الف) Al_2O_3، (ب) Al_2O_3+ 0.28 %wt PVP، (پ) Al_2O_3+ 0.56 %wt PVP، (ت) Al_2O_3+ 0.84 %wt PVP.

با توجه به پارامترهای زبر معرفی شده و مقادیر به دست آمده در جدول ۳، مقادیر S_a، S_q، S_y، S_p وابسته به نمونه‌ی Al_2O_3+ 0.28 %wt PVP کمترین مقدار هستند که به ترتیب برابرند با ۱۶، ۲۱، ۱۴۸ و ۸۷ نانومتر. کمترین اختلاف قله و دره‌ی (S_v) نیز وابسته به همین نمونه است. اما چنانکه در ستون آخر جدول ۳ ملاحظه می‌شود، مقدار S_m وابسته به همین نمونه کمترین مقدار و برابر ۰/۴ پیکومتر است. بدین ترتیب با توجه به اینکه زبری در سطح منجر به کاهش تحرک-پذیری حامل‌ها می‌شود، لذا نمونه‌ی Al_2O_3+ 0.28 %wt PVP دارای کمترین زبری مناسب‌ترین سطح است.

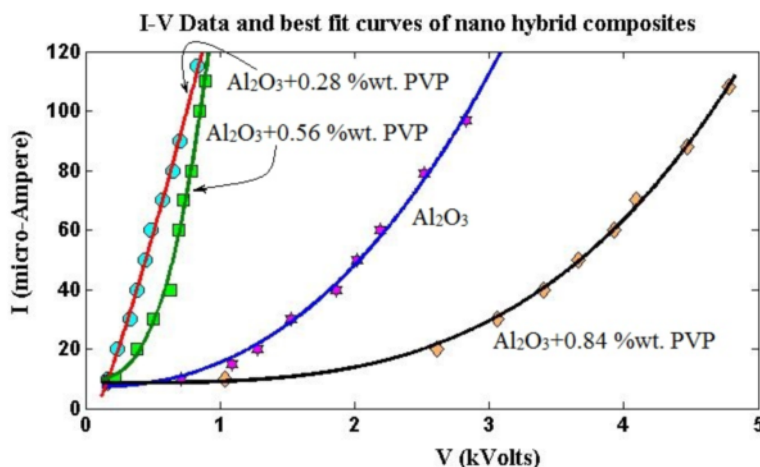
برای بررسی خواص الکتریکی نمونه‌ها، خازن‌هایی با نانوپودرهای Al_2O_3 و Al_2O_3/PVP ساخته، و ظرفیت نمونه‌ها (C) با استفاده از GPS 132 A اندازه‌گیری شده، و سپس ثابت دی‌الکتریک (k) با استفاده از فرمول $k = \frac{Cd}{\varepsilon_0 A}$ محاسبه شد. برای قرص‌های ساخته شده‌ی ما $A = 1.13\ cm^2$ و $\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \left(\frac{C^2}{Nm^2}\right)$ و d = 2 mm است.

نتایج به دست آمده در جدول ۴، نشان می دهد که ظرفیت (C)، ثابت دی‌الکتریک (k)، عامل کیفیت (Q_F)، و عامل اتلاف ($D_F = 1/Q_F$)، با اضافه کردن PVP در نمونه‌ها تغییر می‌کنند. عامل کیفیت بیانگر بازده‌ی خازن بر حسب اتلاف انرژی است و به صورت ($Q_F = X_C/R_C$) تعریف می‌شود که در آن X_C مقاومت القایی و R_C مقاومت معادل خازن است. بالاترین ثابت دی‌الکتریک در بسامد 1kHz، وابسته به Al_2O_3+0.28 %wt. PVP و در بسامد 120kHz وابسته به Al_2O_3+0.56 %wt. PVP است.

در شکل ۷ داده‌های I-V و بهترین منحنی‌های برازش شده به این داده‌ها آمده‌اند. مقایسه‌ی بین منحنی‌های I-V تفاوت-هایی بین نمونه‌های Al_2O_3 و Al_2O_3/PVP را نشان می‌دهند. چنانکه مشاهده می‌شود، رابطه‌ی بین I و V خطی نیست (غیر اهمی است). بنابراین شکل، منحنی وابسته به نمونه‌ی Al_2O_3+0.28 %wt. PVP، در مقایسه با دیگر منحنی‌ها، رفتار تماس اهمی بیشتری را نشان می‌دهد.

جدول ۴ نتایج اندازه گیری C، k، Q_F و D_F مربوط به Al_2O_3 و نمونه‌های کامپوزیتی Al_2O_3/PVP برای فرکانس‌های ۱ و ۱۲۰ کیلوهرتز، که با استفاده از تکنیک GPS 132 A به دست آمده‌اند. سطح و ضخامت لایه میانی به ترتیب برابر بودند با ۱۱۳ سانتی‌متر مربع و ۳ میلی متر.

Samples	Frequency = 1 kHz				Frequency = 120 kHz			
	Q_F	D_F	C (pF)	K	Q_F	D_F	C (pF)	K
Al_2O_3	۲۶/۱	۰/۰۳۸	۴/۷	۱۴	۵/۰	۰/۱۹۹	۵/۰	۱۵
Al_2O_3+0.28 %wt. PVP	۳/۴	۰/۲۹۸	۷/۵	۱۵	۱/۴	۰/۷۰۴	۱۷/۰	**۳۵**
Al_2O_3+0.56 %wt. PVP	۱/۷	۰/۵۹۲	۱۲/۹	**۲۶**	۵/۱	۰/۱۹۸	۳/۰	۶
Al_2O_3+0.84 %wt. PVP	۴/۸	۰/۲۰۸	۶/۲	۱۲	۲/۲	۰/۴۵۷	۸/۰	۱۶



شکل ۷ داده‌های I-V و منحنی‌های برازش شده برای نمونه Al_2O_3 و نمونه‌های کامپوزیتی Al_2O_3+0.28 %wt.PVP، Al_2O_3+0.56 %wt PVP، Al_2O_3+0.84 %wt. PVP.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1395.24.4.14.2]

سطح زیر منحنی‌های I-V وابسته به دی‌الکتریکِ نانوبلورک‌های Al_2O_3/PVP، که می‌توان آن را از طریق روش چرخه ولتامتری (C–V) به دست آورد، با توان (P = VI) متناسب است. میانگین جریان، $\bar{I}$، به صورت زیر به دست می‌آید

$$P = \int I dv \quad (۸)$$

$$\bar{I} = \frac{P}{\Delta V} \quad (۹)$$

مقادیر بیشتر Q_F نشان دهنده آهنگ کمتر اتلاف انرژی نسبت به انرژی ذخیره شده در خازن به صورت زیر است:

$$Q_F = 2\pi \frac{\text{انرژی ذخیره شده}}{\text{انرژی تلف شده در هر چرخه}} \quad (۱۰)$$

مقدار D_F تعریف شده با معادله (۱۱)، آهنگ اتلاف انرژی خازن را می‌دهد و با ماده‌ی دی‌الکتریک به صورت نشان داده شده در جدول ۴ تغییر می‌کند.

$$D_F = 1/Q_F \quad (۱۱)$$

به همین ترتیب، عبارت چگالی جریان بر اساس مدل پُل–فرنکِل به صورت زیر نوشته می‌شود [۱۹]:

$$J_{PF} = AT^2 exp\left(\frac{1}{K_B T}\left[\left(\frac{57.7eV}{kd}\right)^{\frac{1}{2}} - \varphi_t\right]\right) \quad (۱۲)$$

که در آن k ثابت دی‌الکتریک، d فاصله الکترودها بر حسب آنگستروم، φ_t عمق چاه پتانسیل تله، K_B ثابت بولتزمن، T دمای اندازه‌گیری شده و A ثابت ریچاردسون است. اندازه‌ی A برابر با ۱۲۰ به واحد $A/cm^2 K^2$ است.

نتایج نشان می دهند که بیشینه مقدار ثابت دی‌الکتریک با بسامد ۱ kHz مربوط به نانو دورگه همنهشت Al_2O_3+0.56 %wt. PVP(k=۲۶) و در فرکانس ۱۲۰ kHz مربوط به نمونه دورگه‌ی همنهشت Al_2O_3+0.28 %wt. PVP (k=۳۵) می‌باشد (جدول ۴). این نشان دهنده‌ی وابستگی به بسامد ثابت دی‌الکتریک است که ناشی از زیاد شدن ارتعاش‌های کششی و ارتعاشات پیوندها در نمونه‌ها باشد. بنابر اثر پول–فرنکل، این نمونه‌ها در مقایسه با دیگر نمونه‌ها، دارای کمترین جریان نشتی است و می‌توانند در بسامد وابسته، به عنوان یک دی‌الکتریک درگاه برای OFET پیشنهاد شوند. بعلاوه، ثابت دی‌الکتریک (k) وابسته به SiO_2 و Al_2O_3+0.28 %wt. PVP به ترتیب برابر k=۳٫۹ [۲۰] و k=۳۹. بنابراین، از معادله‌ی (۱۳) و با چشم پوشی از φ_t، می‌توان گفت که جریان نشتی نمونه‌ی Al_2O_3+0.28 %wt. PVP که متناسب با $exp(1/\sqrt{k})$ است؛ و در مقایسه با دی‌اکسید سیلیکون کاهش بیشتری می‌یابد.

$$J_{Al2O3+0.28\ \%wt.PVP} \propto exp\left(\left(\frac{1}{k_{Al2O3+0.28\ \%wt.PVP}}\right)^{1/2}\right) \quad (۱۳)$$

در نتیجه، جریان نشتی گذرنده از نمونه Al_2O_3+0.28 %wt. PVP به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد.

برداشت

مسائل فراوانی موجب محدودیت در کاهش ضخامت دی‌الکتریک می‌شوند. این محدودیت ناشی از انتشار بور از دی الکتریک فرا نازک اکسید سیلیکون است. در این زمینه یک نانو هیبرید کامپوزیتی را پیشنهاد می‌کنیم که می‌توان به وسیله آن این مشکل را حل کرد. ضخامت اکسیدی مؤثر (EOT) وابسته به Al_2O_3+0.28 %wt. PVP در مقایسه با SiO_2 حدود ۹ برابر است، که موجب کاهش چشمگیر جریان نشتی و جریان‌های تونلی می‌شود. بنابراین، Al_2O_3+0.28 %wt. PVP، به سبب برخورداری از ثابت دی‌الکتریک بالا و EOTی مناسب، کمترین مقادیر زبری، خواص اهمی و I-V مناسب‌تر و کوچکی اندازه نانوبلورک‌ها (قطر شِرِر برابر با ۴۵ nm)، می‌تواند به عنوان یک جایگزین برای درگاه دی‌الکتریک SiO_2 به کار رود. در نتیجه، نانو دورگه کامپوزیت Al_2O_3+ 0.28 %wt. PVP می‌تواند به عنوان یک ماده درگاه دی‌الکتریک برای نسل بعدی OFET معرفی شود.

مراجع

[1] Bahari A., Morgen P., Pederson K., Li Z. S., *"Growth of a stacked silicon nitride/silicon oxide dielectric on Si (100)"*, Vac. Sci. Technol. B 24 (2006) 2119-2123.

[2] Alagiri M., Ponnusamy S., Muthamizhchelvan C., *"Synthesis and characterization of NiO nanoparticles by sol–gel Method"*, J. Mater. Sci.: Mater. Electron.23 (2012)728-732.

[3] Wu M., Alivov Y. I., Moorkoc H., *"High–k dielectrics and advanced channel concepts for Si MOSFET"*, J. Mater. Sci.: Mater. Electron. 19(2008) 915-951.

[4] Wilk G.D., Wallance R.M., Anthony J.M., *"High-k gate dielectric current status and material properties considerations"*, J. Appl. Phys., 89 (2001) 5243-5275.

[5] Wu H., Zhao Y., White M.H., *"Quantum mechanical modeling of MOSFET gate leakage for*

[DOR: 20.1001.1.17263689.1395.24.4.14.2]

employing high dielectric constant polymer gate dielectrics", J. Phys. D: Appl. Phys. 43 (2010) 465102 (8pp).

[14] Chua L., Ho P., Sirringhaus H., Friend R., *"Observation of Field-Effect Transistor Behavior at Self-Organized Interfaces",* Adv. Mater. 16 (2004) 1609-1615.

[15] Ramesh S., Ng K. Y., *"Characterization of polymer electrolytes based on high molecularweight PVC and Li_2SO_4",* Current Appl. Phys. 9 (2009) 329-332.

[16] Unni Narayanan K. N., Dabos-Seignon S., Nunzi J. M., *"Improved performance of pentacene field-effect transistors using a polyimide gate dielectric layer"*, J. Mater.Sci. 41 (2006) 317-322.

[17] Sirrigahaus H., *"Device Physics of Solution-Processed Organic Field-Effect Transistors",* Adv. Matter. 17 (2005) 2411-2425.

[18] Steudel S., Vusser S. D., et al. *"Influence of the dielectric roughness on the performance of pentacene transistors",* Appl. Phys. Lett. 85 (2004) 4400-4402.

[19] Chang Y., Yang W., Liu S., Hsiao Y., Wu J.,Wu C., *"A hot hole-programmed and low-temperature-formed SONOS flash memory"*, Nanoscale Res. Lett.8 (2013) 340.

[20] Ortiz R. P., Facchetti A., Marks T. J., *"High-k organic, inorganic, and hybrid dielectrics for low-voltage organic field-effect transistors",* Chem. Rev. 110 (2010) 205-239.

high –k gate dielectric", Solid –State Electron, 50 (2006) 1164-1169.

[6] Deman A., Tardy J., *"PMMA–Ta 2 O 5 bilayer gate dielectric for low operating voltage organic FETs",* Org. Electron. 6 (2005) 78-84.

[7] Jeong S. H., Bae I.S., Shin Y.S., Lee S. B., Kwak H.T., Boo J.H.,*"Physical and electrical properties of ZrO_2 and YSZ high-k gate dielectric thin films grown by RF magnetron sputtering"* Thin Solid film. 475 (2005) 354-358.

[8] Rudramadevi B. H., Thilagavathi K., Buddhudu S., *"Structural, dielectric and conductivity properties of Mn^{2+}:PVP& Ni^{2+}:PVP polymer films",* Indian J.Phys. 86 (2012) 997-1001.

[9] Maria Sonmez et al. *"Synthesis and characterization of hybrid PVA/Al_2O_3 thin film"*, Materials Letters 74 (2012) 132–136 .

[10] Liu H., Xie Z. X., Watanabe H., Qu J., TanakaK., *"Growth of nanocrystalline metal dots on the Si(111)-7×7 surface saturated with C_2H_5OH",* Phys. Rev. B.601 (2007) 5093-5097.

[11] Bang Seokhwanet al., *"Al_2O_3 buffer in a ZnO thin film transistor with poly-4-vinylphenol dielectric"*, Semicond. Sci. Technol. 24 (2009) 025008 (6pp).

[12] Hayati A., Bahari A., *"Electrical properties of NiO/PVC nano hybrid composites for organic field effect transistors",* Indian J. Phys. 89 (2015) 145-54 .

[13] Kim S. H., et al., *"Hysteresis behaviour of low-voltage organic field-effect transistors*